

УДК 621.387.3

В.І. Крижанівський, А.І. Кузьмичев, Р.Ю. Чаплинський

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ТОНКОПЛІВКОВОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗОНАТОРА

The aim of this paper is to investigate the influence of properties of thin films and glass dielectric barriers (thickness from 8 μm to 1 mm) on the ozonizer characteristics and choose the best. This paper presents experimental results on the effect of parameters of dielectric barriers made from polymeric materials (Lavsan, Teflon), quartz glass as well as SiO_2 thin films, deposited by the reactive electron-beam vaporization on the ozonizers characteristics. Experimental results show that the dielectric barrier breakdown voltage decreases with roughness of electrode surface under dielectric. Also, experimental results show that the use of the dielectric barriers with SiO_2 thin films and polymeric materials leading to the increase of ozonizes efficiency. But polymeric materials show low life cycle. That's why SiO_2 thin film deposited on a polished electrode surface is the best dielectric material to use in ozonizers.

Вступ

Озон — хімічно активна сполука, за нормальних умов газоподібна, яка є сильним окиснювачем. Завдяки цьому озон застосовують для очистки води та повітря, в хімічній промисловості, в медицині та санітарії, а також у виробництві електронної техніки [1–4]. Озон частіше за все отримують у бар'єрному розряді з кисню чи повітря. Газ пропускається через розрядний проміжок, що містить діелектричний бар'єр на одному чи обох електродах, до яких прикладена висока змінна чи імпульсна напруга. Під дією електронних ударів молекули кисню дисоціюють на атоми, які внаслідок їх взаємодії з молекулами оточуючого газу утворюють озон.

Хоча на перший погляд генератор озону (озонатор) на основі бар'єрного розряду не надто складний пристрій, сам бар'єрний розряд не до кінця вивчений з огляду на складні фізико-хімічні процеси в ньому. З урахуванням того, що коефіцієнт корисної дії таких озонаторів не перевищує 30 %, та й той отримується тільки з охолодженням рідким азотом [4], оптимізація конструкції озонаторів є доцільною. Оптимальна робота озонатора — коли для отримання певної концентрації озону витрачається мінімальна потужність.

Ефективність озонатора на бар'єрному розряді можна підвищити, знизивши амплітуду живлячої напруги за рахунок зменшення імпедансу діелектричних бар'єрів. Для цього треба підібрати матеріал бар'єра з високою діелектричною сталою та невеликою товщиною, враховуючи, що замала товщина бар'єра призводить до його пробую.

Постановка задачі

Мета роботи — дослідити вплив параметрів тонкоплівкових і скляних діелектричних бар'єрів товщиною від 8 μm до 1 мм на характеристики озонатора і вибрати кращий за товщиною та матеріалом озонатор.

Експериментальна установка

У промислових озонаторах частіше за все застосовуються циліндрична та плоско-паралельна геометрії електродних систем. При однаковій площі електродів та інших рівних параметрах (амплітуда та частота живлячої напруги, величина розрядного проміжку, матеріал електродів, товщина діелектричних бар'єрів, вологість і температура повітря) ефективність для озонатора з циліндричною геометрією електродів та озонаторів з плоско-паралельними електродами є однаковою. В наших дослідках ми вибрали плоско-паралельну геометрію тому, що вона простіша в монтажі та юстируванні, а на плоский електрод легше нанести тонкоплівковий бар'єр як у вигляді полімерної плівки, так і методом електронно-променевого випаровування. Площа електродів становила 36,3 cm^2 . На рис. 1 зображено конструкцію експериментального озонатора.

До складу цього озонатора входять: металевий дисковий електрод 1 з виточкою для електродної металевої вставки 2 з нанесеним на робочу поверхню шаром діелектрика (діелектричним бар'єром), чашкоподібний ізолятор 3 з органічного скла і грибоподібний другий електрод 4 з плоскою робочою поверхнею. Обидва

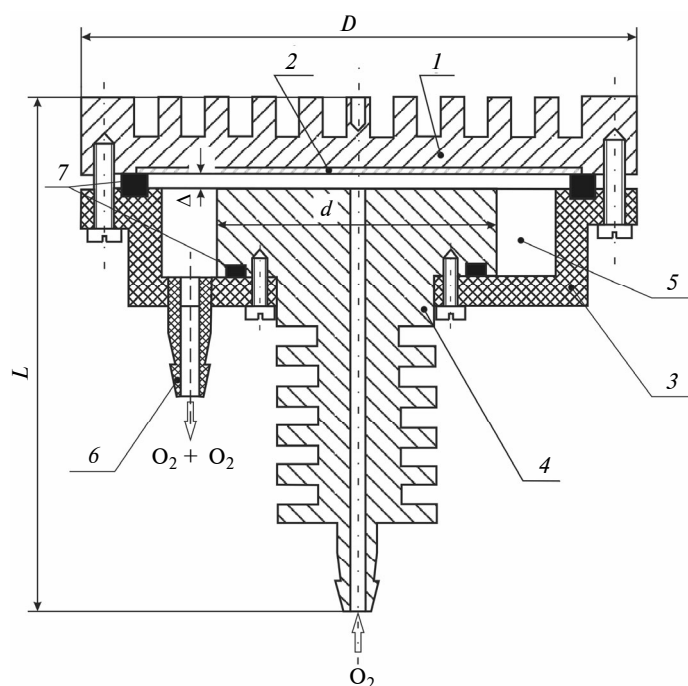


Рис. 1. Конструкція озонатора: $D - 140$ мм, $L - 125$ мм, $d - 68$ мм

електроди для кращого охолодження мають ребристу поверхню (проточки). Для вводу кисню безпосередньо в розрядний проміжок вздовж вісі другого електрода 4 зроблено отвір, який зовні закінчується штуцером для з'єднання еластичною трубкою з системою подачі кисню. Озоно-киснева суміш збиралася в колекторі у вигляді кільцевої вставки 5 і виводилася через фторопластовий штуцер 6, вмонтований в чашкоподібний ізолятор 3. Герметичність озонатора забезпечувалась фторопластовими кільцевими прокладками 7. Обидва електроди з ізолятором з'єднувались за допомогою гвинтів. Величина розрядного проміжку Δ регулювалась зміною товщини прокладок 7. Електроди 1 і 4 виготовлялись із дюралюмінію, а електродна вставка 2 — із нержавіючої сталі X18H10T.

Електричне живлення озонатора здійснювалось від промислової мережі (50 Гц, 220 В) через підвищувальний трансформатор. Амплітуда вихідної напруги трансформатора змінювалась регулюючим трансформатором типу ЛАТР, підключеним до первинної обмотки. Напруга на електродах озонатора вимірювалась електростатичним вольтметром С96, а величина струму — міліамперметром електромагнітної системи. Далі в статті напруга та струм озонатора будуть указані в ефективних величинах.

Кисень з балона потрапляв в озонатор через понижуючий редуктор, редуктор точного регулювання та ротаметр. Концентрація озону на виході озонатора вимірювалась за допомогою оптичного газоаналізатора типу "Циклон-Реверс" фірми ОПТЕК (м. Санкт-Петербург). До виходу озонатора підключався деструктор озону.

У роботі досліджувалися діелектричні бар'єри з тонких плівок SiO_2 , нанесені спеціально розробленим методом осадження з електронно-променевим випаровуванням злитка кварцового скла. Випаровування проводилося в кисневому середовищі (тиск 0,1 Па) за допомогою електронно-променевої гармати високовольтного тліючого розряду [5]. Разом із плівкою SiO_2 як бар'єр в озонаторі використовувалися змінні бар'єри різної товщини із кварцового скла (1–2,5 мм), фторопласту (політетрафторетилену) та лавсану (поліетилентерафтолату), що притискалися до електродної вставки 2 за допомогою кільцевої прокладки 7.

Величина міжелектродного проміжку озонатора встановлювалась рівною 1,5 мм для усіх бар'єрів. Швидкість потоку кисню через розрядний проміжок була сталою ($1/60$ $\text{дм}^3/\text{с}$).

Експериментальні дослідження і їх обговорення

Як відомо, концентрація озону на виході озонатора залежить від температури газу, концентрації електронів, функції їх розподілу по енергіях та концентрації активних частинок у розрядному проміжку [1]. Вони пов'язані з струмом розряду, а він залежить від напруги, що прикладена до електродів озонатора, тому аналізувати роботу озонатора доцільно за його вольт-амперними характеристиками (ВАХ).

На рис. 2. наведені ВАХ озонатора, які ілюструють вплив товщини діелектриків на напругу, необхідну для підтримання бар'єрного розряду і синтезу необхідної концентрації озону в ньому. Напругу на озонаторі (U) можна визначити як

$$U = U_p + I \times Z_d$$

де U_p — спад напруги на розрядному проміжку, I — струм розряду, Z_d — імпеданс діелектрика. Оскільки U_p бар'єрного розряду ве-

личина стала [6], то можна сказати, аналізуючи рис. 2, що зменшення товщини діелектричного бар'єра веде до збільшення крутизни характеристики і, відповідно, до зменшення робочої напруги на озонаторі. Видно, що при значних товщинах діелектричного бар'єра (~1 мм), які використовуються найчастіше, необхідні досить високі робочі напруги (10 кВ і більше). При цьому напруга U_p , яку легко визначити продовженням прямолінійної верхньої частини характеристики до перетину з віссю абсцис (якщо $I = 0$, то $U \approx U_p$), є досить низькою (одинарці кіловольт). Звернемо увагу на характеристики, які одержані при використанні лавсанових бар'єрів малої товщини (див. рис. 2). Видно, що зі зменшенням товщини діелектрика до сотень мікрометрів робоча напруга стає досить близькою до напруги саме на розрядному проміжку, оскільки спад напруги на бар'єрі стає відносно невеликим, і хід характеристики визначається переважно зниженням напруги на розрядному проміжку.

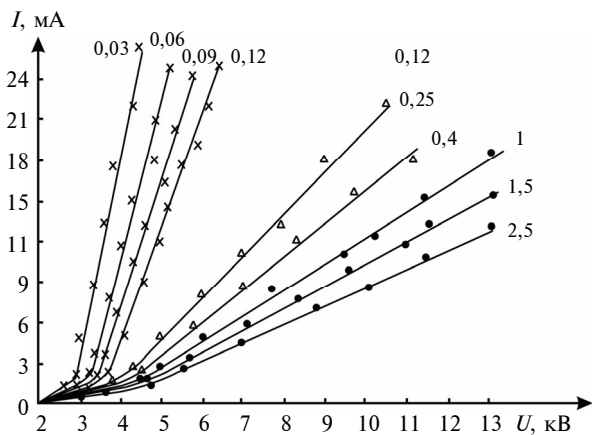


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики озонатора. Діелектричний бар'єр: • — скло, Δ — фторопласт, \times — лавсан; цифри на кривих вказують на товщину діелектрика в міліметрах

На рис. 3 показано залежність концентрації озону на виході озонатора від величини ефективного струму для різних матеріалів і товщини діелектричних бар'єрів. Досить близьке розміщення експериментальних точок вказує на те, що концентрація озону, який синтезується в озонаторі, при тому самому струмі практично не залежить від матеріалу діелектрика, а також від його товщини за інших рівних умов. У той же час зменшення товщини діелектричного бар'єра дає можливість знизити робочу напругу.

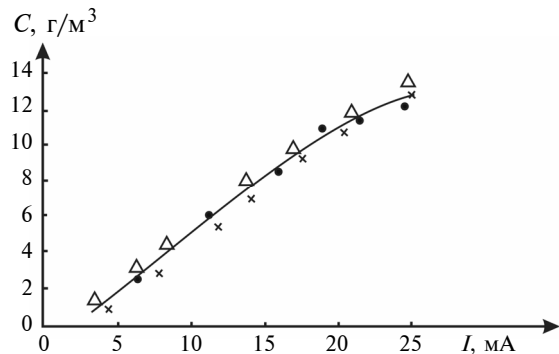


Рис. 3. Залежність концентрації озону на виході озонатора від його струму. Діелектрики: • — скло — 1 мм; Δ — фторопласт — 0,4 мм, \times — лавсан — 0,06 мм

Незважаючи на те що використання тонких діелектричних бар'єрів із лавсану або фторопласту дає значне зниження робочих напруг на озонаторі порівняно з відомими скляними, вони не відповідають іншим не менш важливим вимогам (з теплостійкості, довговічності та іншим). У наших умовах строк служби полімерних бар'єрів (до пробою) становив від десятків хвилин до кількох годин при неперервній роботі озонатора. В зв'язку з цим були проведені експериментальні дослідження озонатора з тонкоплівковим бар'єром із неорганічного матеріалу — SiO_2 , який, на наш погляд, відповідає необхідним вимогам для роботи в умовах озонно-плазмового середовища і високих імпульсних електричних навантажень. Для проведення експериментів була виготовлена серія дискових електродних вставок різного ступеня механічної обробки (полірування) поверхні, на яку наносилось діелектричне покриття за допомогою розробленої технології електронно-променевого випаровування кварцового скла та осадження SiO_2 в реакційному газовому середовищі [5].

Було встановлено, що електрична міцність діелектричних покриттів малої товщини (10–30 мкм) в умовах бар'єрного розряду сильно залежить від ступеня механічної обробки поверхні електродної вставки під покриттям. Так, за наявності виступів на поверхні висотою більше 2–5 мкм діелектричне покриття товщиною 8–10 мкм пробивається уже при збудженні бар'єрного розряду (за напруги близько 1 кВ), при товщині діелектрика 15–20 мкм пробій настає при струмі розряду близько десяти міліампер, що відповідає напрузі 1,5–2 кВ (рис. 4). Необхідної електричної міцності при струмах у десятки міліампер вдалося досягти підвищен-

ням ступеня полірування поверхні (при зменшенні висоти виступів до рівня 0,7–0,8 мкм), товщина покриття становила 25–30 мкм. При цьому робоча напруга досягала 2,5–3 кВ. При струмі розряду 10 мА строк служби озонатора з бар'єром із SiO_2 (до пробою) був більше 25 год.

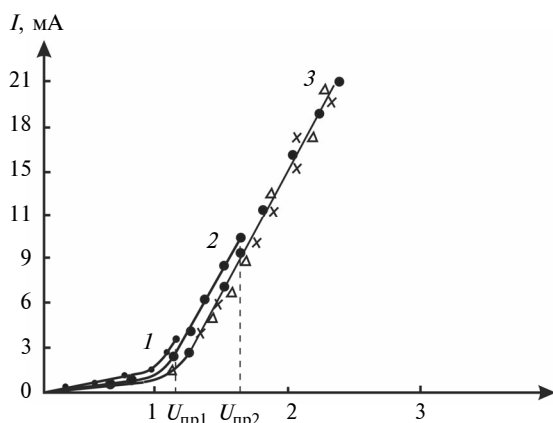


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики озонатора з тонкоплівковим SiO_2 діелектричним бар'єром. Товщина діелектрика: 1 – 10 мкм; 2 – 15 мкм; 3 – 25 мкм (крива 3 побудована за результатами дослідження 3-х екземплярів вставок); $U_{\text{пр1}}$, $U_{\text{пр2}}$ – напруги пробою діелектричних бар'єрів

Необхідно відмітити добре відтворення експериментальних даних, одержаних під час випробовування озонатора з електродними вставками з ідентичними параметрами діелектричного покриття (див. рис. 4, крива 3). Завдяки цьому залежності концентрації озону на виході озонатора від струму (рис. 5) також добре відтворюються. Незначне відхилення експериментальних залежностей, наведених на рис. 3 і 5, від прямої може бути пояснене впливом підвищення температури електродів та газу на концентрацію озону з ростом середнього струму, оскільки експерименти проводились при природному повітряному охолодженні електродів озонатора. Для стабілізації температури, а відповідно, і вихідних параметрів озонатора, останній, незважаючи на значне зниження робочої напруги, потребує примусового повітряного охолодження за допомогою вентилятора. Проведено випробування створеного озонатора в розробленому раніше в НТУУ "КПІ" на кафедрі електронних приладів та пристроїв озонно-терапевтичному апараті з примусовим повітряним охолодженням типу "Активатор кисню АКБ" [7], яке показало стабільну його роботу з паспортними вихідними параметрами

при меншій майже в 2 рази напрузі живлення озонатора.

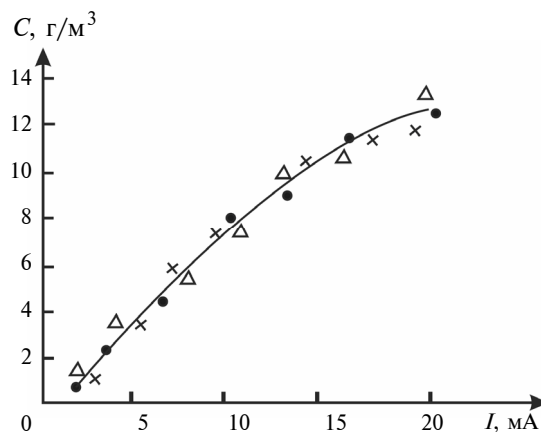


Рис. 5. Залежність концентрації озону на виході озонатора від його струму для трьох екземплярів вставок. Товщина діелектрика (SiO_2) – 25 мкм

Висновки

Експериментальні дослідження впливу матеріалу і товщини діелектричних бар'єрів на характеристики озонатора показали, що застосування тонких діелектричних бар'єрів з лавсану та фторопласту дає змогу зменшити амплітуду живлячої напруги, тобто підвищити ККД озонатора. Проте ці матеріали не задовольняють вимоги температурної стійкості та довговічності озонатора. В ході експериментів добре зарекомендували себе тонкоплівкові покриття SiO_2 , виготовленні спеціально розробленим методом електронно-променевого випаровування та осадження в реакційному газовому середовищі. Досліди показали, що матеріал діелектричного бар'єра (із застосованих) не впливає на роботу озонатора. Також у ході експериментальних досліджень встановлено, що підвищена шорсткість електрода, на який наноситься тонкий плівковий діелектричний бар'єр, зменшує величину напруги пробою та призводить до виходу його з ладу.

Позитивний вплив зменшення товщини діелектричного покриття на параметри озонатора нашоухує на думку про мікроструктурування не тільки діелектричного бар'єра, а й самої геометрії електродної системи. Також доцільно підвищити строк служби бар'єрів з неорганічних матеріалів до кількох сотень годин. Подальші теоретичні та практичні дослідження планується присвятити розвитку цих ідей.

1. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 480 с.
2. *Кузьмичев А.И.* Применение озона в технологии тонких пленок и эпитаксии // Труды Укр. вакуумного общества. — 1997. — 3. — С. 393–402.
3. *Техника и технология озонотерапии* / А.Г. Богданов, В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев и др. // Укр. журнал мед. техники и технологии. — 1994. — № 1/2. — С. 22–26.
4. *Fridman A.* Plasma Chemistry. — New York: Cambridge University Press, 2008. — 978 p.
5. *Белевский В.П., Кузьмичев А.И., Мельник В.И.* Электронно-ионные устройства для нанесения тонкопленочных покрытий. — К.: Общество “Знание” Украины, 1982. — 21 с.
6. *Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М.* Теория динамических характеристик озонаторов // Журнал физической химии. — 1957. — 31, вып. 7. — С. 1628–1635.
7. *Бевза О.Н., Денбовецкий С.В., Кузьмичев А.И.* Активатор кислорода для озонотерапии // Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы физической и биомедицинской электроники”: Сб. докладов. — К., 1996. — С. 99–102.

Рекомендована Радою
факультету електроніки
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
23 грудня 2011 року